

بررسی رفتار فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای جدارنازک برش خورده تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری و مایل

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

محمد بای

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

عباس رهی*

چکیده

جاذب‌های انرژی یا همان ضربه‌گیرهای مکانیکی انواعی از سازه‌های مکانیکی هستند که برای تبدیل کل و یا قسمتی از انرژی جنبشی ناشی از برخورد به کار می‌روند. بالا بردن میزان کارایی جاذب‌ها اعم از افزایش میزان انرژی ویژه جذب شده یا کاهش بیشینه نیروی اولیه برخورد، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده و در این زمینه روش‌های گوناگونی ارائه شده است. در این مقاله، ابتدا تأثیر برش لبه جاذب بر روی مقدار نیروی اولیه فروریزش، متوسط نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب‌شده و همچنین شکل فروریزش پوسته استوانه‌ای آلومینیومی تحت اثر بارگذاری شبه‌استاتیکی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سپس اثر ابعاد هندسی پوسته شامل ضخامت، قطر و زاویه نیم‌رأس، پارامترهای هندسی لبه شامل هندسه و ابعاد آن و همچنین زاویه برخورد بر رفتار فروریزش پوسته استوانه‌ای برش خورده، بررسی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که ایجاد برش‌های متقارن در لبه پوسته‌های استوانه‌ای، باعث کاهش نیروی اولیه فروریزش می‌شود که این نیرو با افزایش تعداد برش در لبه جاذب کاهش بیشتری پیدا می‌کند. همچنین ایجاد برش‌های مذکور در مقطع پوسته‌های استوانه‌ای باعث کاهش متوسط نیروی فروریزش و انرژی جذب شده، می‌شود. این کاهش در متوسط نیروی فروریزش و انرژی جذب شده نسبت به کاهش نیروی اولیه فروریزش نامحسوس است. این خاصیت باعث می‌شود تا بتوان از این سیستم جذب انرژی در مواردی که برخورد اولیه برای سیستم مهم است، استفاده کرد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که برای حالت ۲ برش مربعی در لبه پوسته استوانه‌ای حدود ۱۸/۷ درصد، و برای حالت ۴ برش مربعی حدود ۳۴ درصد، مقدار نیروی اولیه جاذب نسبت به مقدار نیروی اولیه پوسته استوانه‌ای بدون برش کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های جاذب انرژی، لوله‌های متقارن محوری، پوسته‌های استوانه‌ای جدارنازک، فروریزش محوری.

Investigation of crashworthiness behavior of thin-walled cylindrical tubes with cutting-edges under axial and oblique quasi-static loading

M. Bay
A. Rahi

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

The energy absorbers are the mechanical structures that are used for transformation some or whole kinetic energy resulted from collision to other kinds of energy. Efficiency improvement of these absorbers has been always the goal of researchers, and so the various methods have been used to this field. In this paper, firstly, the effect of cutting-edges on initial crushing load, mean crushing load, absorbed energy and the mode of crashworthiness of thin-walled cylindrical aluminum tubes is investigated. Then the effects of geometrical dimensions of the tube-like thickness, diameter, semi-apical angle, the geometry and dimensions of the edge and the angle of applied load on the crashworthiness behavior of thin-walled structure are examined. The results show that creation of symmetrical cuttings on the edge, decrease the initial crushing load. These cuttings decrease mean crushing load and absorbed energy too. These declines in mean crushing load and absorbed energy are negligible in compared to initial crushing load. This phenomenon makes this system useful for cases in which initial shock is significant. The results also show that initial crushing load for the 2 squares cutting-edges and for the 4 cutting-edges were reduced about 18.7 % and 34 %, respectively, compared to the initial crushing load of the thin-walled cylindrical tube-like without cutting-edges.

Keywords: Energy Absorber Systems, Axisymmetric Tubes, Thin-Walled Cylindrical Tubes, Axial Crushing.

۱- مقدمه

همین دلیل پژوهشگران همواره در صدد بالا بردن میزان کارایی این نوع از جاذب‌ها بوده‌اند. مطالعه بر روی این نوع از جاذب‌ها در طیف‌های گسترده‌ای صورت گرفته است. بارگذاری محوری پوسته‌های جدار نازک با مقاطع دایره‌ای اولین بار توسط الکساندر [۱] در سال ۱۹۶۰ به صورت نظریه مورد بررسی قرار گرفت. از آن پس چنین خوردگی لوله‌های جدارنازک به عنوان یک مکانیزم برای جذب انرژی معرفی شد. مولمان [۲] در سال ۱۹۸۲ نظریه پوسته‌های نازک را مورد مطالعه قرار داد. او نظریه‌های پوسته‌های متقارن را ارائه نمود و معادلات حاکم بر هندسه سازه‌های جدار نازک از جمله پوسته‌های استوانه‌ای، مخروطی و کروی را استخراج کرد. آبراموویچ و جونز [۳] در سال ۱۹۸۴ فروریزش

کاربرد سیستم‌های جذب انرژی در صنایع مختلف به ویژه در صنایع خودروسازی به عنوان راه حلی برای حداقل کردن اثر ضربه و خسارت وارده به سرنشینان و بالا بردن ایمنی خودرو، از اهمیت خاصی برخوردار است. به این منظور سیستم‌های گوناگون جذب انرژی به کار گرفته شده‌است که در این بین لوله‌های جدارنازک به خاطر سبکی، طول لهدیگی زیاد، ظرفیت جذب انرژی بالا و نسبت جذب انرژی به جرم بالا به عنوان یکی از سیستم‌های جذب انرژی کاربرد روز افزونی یافته است. این سیستم‌ها علاوه بر صنایع خودروسازی در صنایع مختلفی از جمله راه‌آهن، کشتی‌سازی و نظامی نیز کاربرد دارند. به

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a_rahi@sbu.ac.ir

سال ۱۳۹۶، با روش تجربی، مقدار انرژی جذب شده توسط لوله‌های مخروطی دوجداره تحت اثر بارگذاری محوری و مایل را بررسی کردند. دامغانی نوری و همکاران [۱۸] نوع فروریزش و رابطه بین نیرو و جابجایی را در جاذب‌های استوانه‌ای ساخته شده از ورق‌های مشبک را بررسی کردند. آنها نشان دادند که ورق‌های مشبکی با وجود وزن کم، دارای ظرفیت جذب انرژی بالایی هستند. آذرخش و همکاران [۱۹] با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های تجربی، رفتار لهیدگی و مقدار انرژی جذب‌شده توسط لوله‌های استوانه‌ای برنجی را مطالعه کردند. در سال ۱۳۹۸، علوی نیا و رحمانی [۲۰]، تغییر شکل و جذب انرژی سازه‌های ساندویچی متشکل از دو لوله آلومینیومی پر شده از فوم را مطالعه کردند.

در مقاله حاضر، تأثیر برش لبه جاذب، ابعاد هندسی پوسته شامل ضخامت، قطر و زاویه نیم‌رأس، بر نیروی اولیه فروریزش، متوسط نیروی فروریزش، میزان انرژی جذب‌شده و شکل فروریزش پوسته استوانه‌ای آلومینیومی تحت اثر بارگذاری شبه استاتیکی به روش شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که ایجاد برش‌های متقارن در لبه، باعث کاهش نیروی اولیه فروریزش می‌شود.

۲- شبیه‌سازی و مدل‌سازی فروریزش جاذب انرژی استوانه‌ای

۲-۱- تعریف هندسه

شکل ۱ هندسه و بارگذاری یک نمونه از پوسته‌های استوانه‌ای را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، قطعه استوانه‌ای بین دو قطعه مسطح متصل به فک‌های متحرک و ثابت دستگاه فشار یونیورسال فشرده می‌شود. این قطعات در مقایسه با نمونه استوانه‌ای صلبیت بیشتری دارند. بنابراین فرض می‌شود که این قطعات در مقایسه با پوسته استوانه‌ای صلب است و به صورت دو صفحه‌ی R_1 و R_2 نشان داده می‌شوند. لازم به توضیح است که بارگذاری شبه استاتیکی و سرعت آن ثابت و یکنواخت در نظر گرفته شده است.

۲-۲- قیدها

به طور کلی در شبیه‌سازی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای از قیدهای زیر استفاده می‌شود:

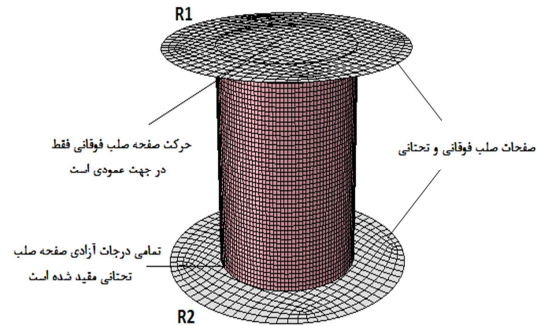
الف) قید جسم صلب: این قید به کاربر اجازه می‌دهد تا حرکت نواحی یک مدل را نسبت به حرکت یک نقطه مقید کند. در شبیه‌سازی حاضر صفحات صلب به نقاط مرجع (R_1 و R_2) خود مقید می‌شوند.
 ب) قید بستن: در برخی از مسائل نقاط واقع بر دو سطح در تماس با یکدیگر نمی‌توانند نسبت به هم حرکت داشته باشند و اتصال کاملی بین دو سطح برقرار می‌شود. این شرط تماس را اصطلاحاً قید بستن گویند این قید به کاربر اجازه می‌دهد تا دو ناحیه با مش‌های متفاوت را با یکدیگر ترکیب کند به طوری که درجات آزادی سطح پیرو توسط درجات آزادی سطح پایه مقید شود. در فروریزش پوسته استوانه‌ای یک‌سرگردار فرض می‌شود، سطح قاعده پایین نمونه‌های استوانه‌ای گردار است. بنابراین در این شبیه‌سازی برای مقید کردن قاعده پایین پوسته‌ی استوانه‌ای (سطوح پیرو) به صفحه صلب R_2 (سطوح پایه) از قابلیت قید بستن استفاده می‌شود به طوری که تمامی درجات آزادی

لوله استوانه‌ای را تحت اثر بارگذاری محوری شبه استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند. یامادا یاسوا و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۵، انرژی جذب‌شده و رفتار فروریزش لوله‌های آلومینیومی تقویت‌شده با فوم را مورد مطالعه قرار دادند. یوون و نوریک [۵] در سال ۲۰۰۸، اثر ایجاد نقص از جمله ایجاد شیار، دندان‌ه برش روی لوله‌های آلومینیومی با مقطع دایره و مربع بر مود فروپاشی و نیروی بیشینه لهیدگی را به روش تجربی و عددی بررسی کردند. آنها نشان دادند که ایجاد نقص در لوله از جمله ایجاد برش‌ها و شیارها و دندان‌ها باعث فعال شدن مود فروپاشی متقارن و کاهش نیروی بیشینه می‌شود. قمریان و ابدی [۶] در سال ۲۰۱۱ به بررسی عددی و آزمایشگاهی لوله‌های استوانه‌ای سر بسته تحت بارگذاری محوری پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که بیشینه نیروی اولیه لوله‌های سر بسته توخالی و تقویت شده با فوم، ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر از لوله‌های سر باز است. آذرخش و قمریان [۷] در سال ۲۰۱۷، میزان انرژی جذب شده در لوله‌های استوانه‌ای و مخروطی دو سر گردار تحت بارگذاری محوری و مایل را مورد بررسی قرار دادند. آنها در پژوهش خود، لوله‌های جدارنازک را از هر دو انتها بین دو صفحه صلب، ثابت کرده و تحت اثر بارگذاری محوری و مایل قرار داده و سپس نحوه فروریزش نمونه‌ها، تغییرات نیرو و مقدار انرژی جذب شده در آنها را مورد مطالعه قرار دادند. احمدی و اصغری [۸] در سال ۲۰۱۹، تأثیر ایجاد شیارهای دور تا دوری روی لوله‌های مخروطی توخالی بر مقدار جذب انرژی در حالت بارهای شبه استاتیکی محوری و مایل را بررسی کردند. آنها برای این منظور لوله‌های مخروطی با هندسه مختلف را به صورت موج‌دار درآورده و سپس تأثیر پارامترهای مختلف سیستم بر جذب انرژی را با استفاده از روش عددی و تجربی مطالعه کردند. در سال ۲۰۱۹، نیکخواه و همکاران [۹] کارآیی جذب انرژی لوله‌های جدار نازک مشبک با سطح مقطع‌های مختلف تحت اثر بارگذاری دینامیکی را به روشهای تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند. ایساک [۱۰] در سال ۲۰۱۹ میلادی، رفتار دینامیکی برخورد مایل لوله جدار نازک با حضور ترک و بدون حضور ترک را به صورت عددی مورد مطالعه قرار داد. سان و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸ میلادی، رفتار فروریزش و برخورد یک لوله آلومینیومی تحت اثر بار محوری و بار مایل را به روش تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمون‌های تجربی را در پنج حالت بارگذاری مایل با زاویه‌های ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه نسبت به محور طولی لوله جدار نازک آلومینیومی انجام دادند و سپس نتایج را به صورت نمودارهایی ارائه کردند. در سال ۲۰۱۸، رهی [۱۲] ظرفیت جذب انرژی توسط لوله‌های مخروطی جدارنازک را با استفاده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی تحت اثر بار دینامیکی مطالعه کرد. داودی و کیم [۱۱] در سال ۲۰۱۸ میلادی، سه گام متوالی را برای افزایش کارآیی فروریزش سازه‌های جدارنازک تحت اثر نیروی دینامیکی محوری فشاری ارائه کردند. آنها نتایج عددی لوله جدارنازک مقطع مربعی شکل را با نتایج حل تحلیلی صحت‌گذاری کردند. نجف زاده اصل و همکاران [۱۴] و [۱۵] در سال ۱۳۹۷، با استفاده از روش تجربی، رفتار لوله‌های کامپوزیتی شیشه‌اپوکسی تحت اثر بارگذاری محوری و شبه استاتیکی را بررسی کردند. در همان سال، آذرخش و بابایی [۱۶] نحوه فروریزش و میزان جذب انرژی لوله‌های برنجی با سطح مقطع مربعی، تحت اثر بارگذاری شبه استاتیکی را مورد مطالعه قرار دادند. آذرخش و همکاران [۱۷] در

استوانه ای آلومینیوم مشابه جدول ۳ به نرم افزار داده می شود. همچنین ضریب اصطکاک ۰/۱۵، بین سطح بیرونی پوسته استوانه‌ای با صفحه صلب فوقانی در نظر گرفته می شود و برای تماس سطوح بیرونی و داخلی پوسته استوانه‌ای با خودش ضریب اصطکاک در نظر گرفته نمی شود [۶].

نوع المان‌ها برای تحلیل اجزای محدود وابسته به هندسه نمونه و روش تحلیل مسائل است. در این پژوهش، برای شبیه سازی پوسته استوانه‌ای تک جداره و صفحات صلب به ترتیب از المان‌های پوسته‌ای چهار گوش (S4R) و المان صلب (R3D4) استفاده می شود. در شکل ۲ شبیه سازی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای تحت اثر بارگذاری محوری با نتایج تجربی مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود، تعداد چین‌ها و نحوه فروریزش مطالعه حاضر با نتایج تجربی مرجع [۶] از تطابق قابل قبولی برخوردار است.

گره‌هایی از پوسته‌ی استوانه‌ای که با صفحه‌ی صلب R_2 در تماس هستند، نسبت به آن ثابت می‌شوند.



شکل ۱- مدل سازی یک نمونه از پوسته استوانه‌ای تک جداره

جدول ۱- مشخصات هندسی نمونه استوانه‌ای مرجع [۶]

هندسه	استوانه
طول (میلیمتر)	۹۷/۵
قطر قاعده (میلیمتر)	۴۹/۷
ضخامت فوقانی (میلیمتر)	۱
ضخامت تحتانی (میلیمتر)	۰/۹۷

جدول ۲- خواص مکانیکی آلومینیوم [۶]

نوع ماده	آلومینیوم
چگالی (kg/m^3)	۲۷۰۰
مدول الاستیسیته (Gpa)	۵۵/۷
ضریب پواسون	۰/۳
تنش تسلیم (Mpa)	۷۸/۱

جدول ۳- مقادیر منحنی تنش- کرنش پلاستیک آلومینیوم [۶]

تنش حقیقی (Mpa)	کرنش پلاستیک
۷۸/۱	۰
۸۶/۳	۰/۰۵۵
۹۴	۰/۱۰۸
۹۸/۲	۰/۱۳۶
۱۰۲/۴	۰/۱۷۶
۱۰۴/۱	۰/۱۸۷



شکل ۲- نتایج تجربی [۶] و شبیه سازی فروریزش پوسته استوانه‌ای

شکل ۳، نمودار نیرو-جابجایی فروریزش نمونه استوانه‌ای در حالت تجربی [۶] و شبیه سازی در این پژوهش را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود، روند تغییر نیرو در نمونه آزمایشگاهی و شبیه سازی حاضر، مشابه است، که نشان از تطابق مناسب این دو حالت دارد.

۳-۲- تعریف خواص مکانیکی پوسته‌های استوانه‌ای

در نرم افزار المان محدود برای معرفی ناحیه الاستیک ماده، مدول یانگ و ضریب پواسون تعریف می شود و برای تعریف ناحیه پلاستیک، منحنی تنش حقیقی-کرنش پلاستیک نمونه‌ی کشش ساده استفاده می شود. در این پژوهش منحنی تنش حقیقی-کرنش پلاستیک به کمک چند خط شکسته برای نرم افزار المان محدود مدل شده است. به طور کلی، در این شبیه سازی برای تعریف تنش حقیقی و کرنش پلاستیک از روابط زیر استفاده شده است:

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} (1 + \epsilon_{eng}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (2)$$

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (3)$$

که در آن σ_{true} و ϵ_{true} به ترتیب تنش و کرنش حقیقی، σ_{eng} و ϵ_{eng} به ترتیب تنش و کرنش مهندسی، ϵ_{pl} کرنش پلاستیک و E مدول الاستیسیته است. باید توجه شود که تنش متناظر با کرنش پلاستیک صفر بیانگر حد تسلیم است. لازم به ذکر است که خواص مکانیکی ماده برای استفاده در شبیه سازی عددی با نرم افزار، مطابق با استاندارد ASTM E8M استخراج شده است.

در قسمت بعد به منظور اعتبارسنجی و اطمینان از صحت شبیه سازی، به مدل سازی و شبیه سازی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک تحت بارگذاری محوری پرداخته می شود. مقایسه نتایج شبیه سازی فروریزش پوسته‌های متقارن محوری با نتایج تجربی پیشین، یکی از راهکارهای مناسب و مفید برای حصول اطمینان از صحت انجام شبیه سازی‌ها و تحلیل‌های پژوهش حاضر است.

۴-۲- صحنه گذاری

در این قسمت به منظور صحنه گذاری از نتایج تجربی مرجع [۶] استفاده می شود. قمریان و همکاران در مرجع [۶] به بررسی آزمایشگاهی و عددی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای سربسته پرداختند. در مطالعه آزمایشگاهی آنها، پوسته‌ها استوانه‌ای از جنس آلومینیوم بوده که مشخصات هندسی آن در جدول ۱ آورده شده است. همچنین خواص مکانیکی آلومینیوم طبق مرجع [۶] در جدول ۲ ارائه شده است. در این شبیه سازی نقاط تنش-کرنش پلاستیک نمونه‌های

۳- نتایج شبیه سازی عددی

از آنجا که ضعف اصلی پوسته‌های استوانه‌ای در نیروی بیشینه اولیه بالای آنها است، بنابراین در این پژوهش، برای غلبه بر این ضعف از برش در لبه پوسته‌های جدار نازک استفاده شده است. جدول ۶ نوع و ابعاد پارامترهای هندسی پوسته استوانه‌ای برای بررسی اثر برش لبه بر رفتار فروریزی آن را نشان می‌دهد.

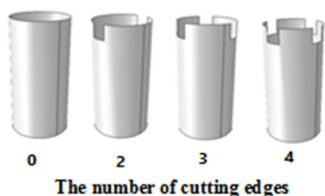
جدول ۶- نوع و ابعاد پارامترهای هندسی پوسته استوانه‌ای برای بررسی اثر برش لبه بر رفتار فروریزی آن

پارامتر	مقدار
زاویه برخورد (درجه)	۱۵، ۱۰، ۰
ضخامت (میلیمتر)	۲، ۱/۵، ۱
زاویه نیم‌راس (درجه)	۷/۵، ۵، ۰
قطر (میلیمتر)	۶۰، ۵۰، ۴۰
ابعاد برش (میلیمتر)	۱۰، ۵
تعداد برش	۴، ۳، ۲، ۰

همچنین ابعاد نامی پوسته‌های استوانه‌ای برای همه حالت‌های مقایسه شده، برای طول، ضخامت و قطر به ترتیب برابر با ۸۰ و ۱/۵ و ۴۰ میلیمتر و برای ابعاد برش به صورت ۱۰×۱۰ میلیمتر (با عرض و عمق شیار ۱۰ میلیمتر) می‌باشد. در ضمن همه حالت‌های ذکر شده برای مقدار ۶۰ درصد لهیدگی (۴۸ میلیمتر) می‌باشد.

۳-۱- اثر تعداد برش لبه

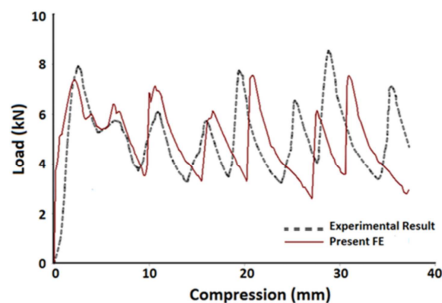
شکل ۴، هندسه پوسته استوانه‌ای را به همراه تعداد برش در لبه آنها را نشان می‌دهد. در این قسمت، قطر، طول و ضخامت پوسته استوانه‌ای به ترتیب ۴۰ و ۸۰ و ۱/۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. هندسه برش نیز به صورت مربعی و به طول ۱۰ میلیمتر انتخاب شده است.



شکل ۴- هندسه پوسته استوانه‌ای به همراه تعداد برش در لبه آن

همان‌طور که دیده می‌شود، در تعداد برش ۲، ۳ و ۴ عدد در لبه، زاویه بین برش‌ها ۱۸۰، ۱۲۰ و ۹۰ درجه است. لازم به توضیح است که جنس پوسته آلومینیوم و خواص مکانیکی آن مطابق مرجع [۶] لحاظ شده است. اثر تعداد برش در لبه بر فروریزش محوری پوسته استوانه‌ای در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تغییر شکل برای تعداد برش ۲ و ۴ به صورت متقارن محوری و برای ۳ برش به صورت الماسی سه گوش پیش بینی می‌شود.

جدول ۴، نتایج شبیه سازی حاضر را با نتایج تجربی [۶] نشان می‌دهد. طبق این جدول برای طول لهیدگی ۳۷/۲۷ میلیمتر (۳۸٪ طول اولیه)، میزان درصد خطای انرژی جذب شده و اولین بیشینه نیروی حالت مدلسازی شده نسبت به آزمایشگاهی به ترتیب در حدود ۱/۶ و ۶/۹ درصد است که نشان از تطابق خوب شبیه سازی با نتایج تجربی دارد.



شکل ۳- نمودار نیرو-جابجایی فروریزش نمونه استوانه‌ای آزمایشگاهی مرجع [۶] و شبیه سازی مورد مطالعه

لازم به ذکر است که در شبیه سازی از نوع مش S4R برای پوسته‌ی استوانه‌ای استفاده شده است. همچنین برای بررسی عدم وابستگی حل مسئله به اندازه مش، مطابق جدول ۵، طول مش از ۴ تا ۱/۲۵ میلی‌متر تغییر یافته و به ازای هر یک از آنها مقدار انرژی جذب شده محاسبه شده است. همان‌طور که از جدول ۵ مشاهده می‌شود، وقتی طول مش از ۴ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر کاهش می‌یابد، مقدار انرژی جذب شده و اگر می‌شود که با کاهش دوباره طول مش، جواب‌ها شروع به همگرا شدن می‌کند. پس وقتی طول مش مقدار ۱/۵ میلی‌متر باشد همگرایی پاسخ از دقت خوبی (خطایی کمتر از یک درصد) برخوردار است و همچنین زمان حل مسئله هم کاهش می‌یابد. در این پژوهش از طول مش ۱/۵ میلی‌متر برای شبیه سازی ها استفاده شده است.

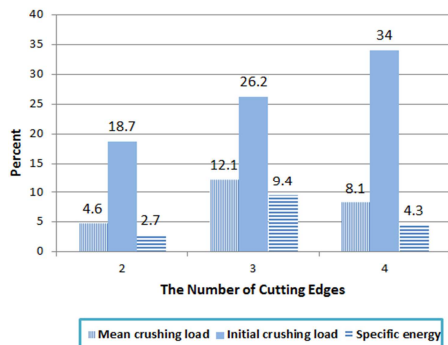
جدول ۴- نتایج تجربی [۶] و مدل سازی پوسته استوانه‌ای تحت اثر بار

گذار محوری

نتایج	اولین بیشینه نیرو (kN)	انرژی جذب شده (J)	نیروی متوسط فروریزش (kN)
آزمایشگاهی [۶]	۷/۹۵	۱۸۶	۴/۹۹
المان محدود	۷/۴	۱۸۳	۴/۹۱

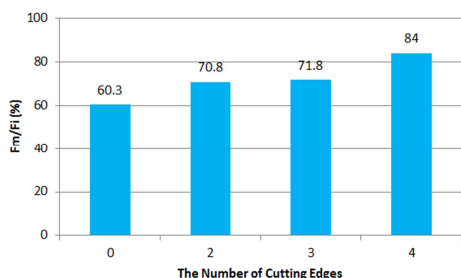
جدول ۵- مقدار انرژی جذب شده برای طول مش‌های مختلف

طول مش انتخاب شده (mm)	انرژی جذب شده (ژول)
۴	۴۴۳/۲
۳	۴۶۷/۸۶
۲	۴۴۴/۵۲
۱/۲۵	۴۲۰/۱۸
۱/۵	۴۱۳/۲۳
۱/۲۵	۴۰۹/۵۳



شکل ۷- درصد کاهش نیروی اولیه و انرژی ویژه پوسته استوانه‌ای به ازای تعداد برش مربعی در لبه

در شکل ۸، نیز تغییرات راندمان نیروی لهیدگی (نسبت متوسط نیروی فروریزش به نیروی اولیه فروریزش) به ازای تعداد برش در لبه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین راندمان نیروی لهیدگی برای حالت ۴ برش در لبه است. علت آن به خاطر این است که این نمونه دارای کمترین مقدار نیروی بیشینه بوده و بنابراین منجر به افزایش راندمان نیروی لهیدگی می‌شود. بنابراین استفاده از پوسته‌های متقارن محوری با چهار برش در لبه در ضربه‌گیرهایی که به منظور کاهش برخورد اولیه برخورد مورد استفاده قرار می‌گیرند، توصیه می‌شود.

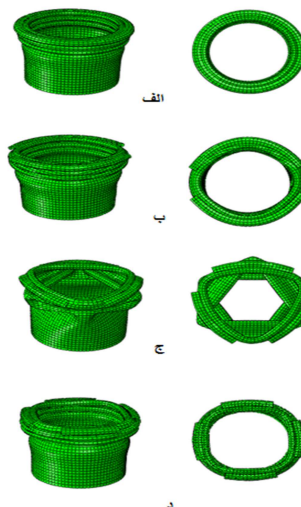


شکل ۸- منحنی درصد تغییرات راندمان نیروی لهیدگی به ازای تعداد برش در لبه

۲-۳- بررسی اثر زاویه نیم‌رأس و تعداد برش لبه

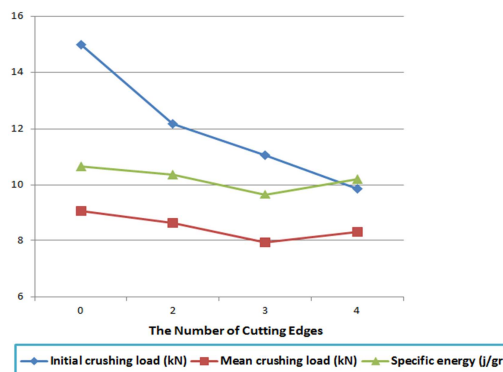
در این پژوهش زاویه نیم‌رأس برابر زاویه دیواره پوسته با محور قائم تعریف شده است. شکل ۹ اثر زاویه نیم‌رأس و تعداد لبه برش خورده را بر نحوه فروریزش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این بررسی زاویه نیم‌رأس در محدوده ۰ تا ۷/۵ درجه تغییر داده شده است و طول پوسته‌های متقارن محوری، قطر قاعده پایینی و ضخامت ثابت به ترتیب برابر ۸۰، ۴۰ و ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

نتایج نشان می‌دهد که زاویه نیم‌رأس تأثیر قابل توجهی بر نیروی فروریزش اولیه، انرژی جذب شده و انرژی ویژه دارد. با افزایش زاویه نیم‌رأس پایداری پوسته تحت بارگذاری محوری کاهش می‌یابد که این امر باعث می‌شود پوسته جدارنازک تحت بارهای کمتری دچار فروریزش شود. در نتیجه باعث کاهش بیشینه نیروهای فروریزش می‌شود. این کاهش در بیشینه نیروهای فروریزش، مطابق شکل ۱۰، به نوبه خود باعث کاهش سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی (یا همان انرژی



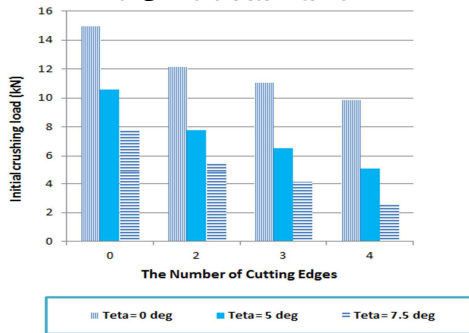
شکل ۵- اثر تعداد برش در لبه پوسته استوانه‌ای بر فروریزش محوری پوسته استوانه‌ای، (الف) بدون برش (ب) دو (ج) سه (د) چهار برش در لبه

در شکل ۶ رفتار فروریزشی پوسته استوانه‌ای شامل نیروی اولیه فروریزش، نیروی متوسط و انرژی ویژه جذب شده به ازای تعداد برش مربعی در لبه برای ۶۰ درصد لهیدگی (۴۸ میلی‌متر) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش تعداد برش لبه سبب کاهش نیروی اولیه فروریزش می‌شود. به طوری که مطابق شکل ۷ مقدار نیروی اولیه برای ۲ برش مربعی در حدود ۱۴/۷ درصد، و برای ۴ برش مربعی در حدود ۳۴ درصد نسبت به پوسته استوانه‌ای بدون برش کاهش یافته است. بنابراین استفاده از برش در لبه کمک شایانی در به حداقل رساندن کمانش ناخواسته (اولری یا کلی) کرده و از شدت اعمال نیروی ناگهانی به سازه اصلی جلوگیری می‌کند.



شکل ۶- نیروی اولیه، نیروی متوسط و انرژی ویژه پوسته استوانه‌ای به ازای تعداد برش مربعی در لبه

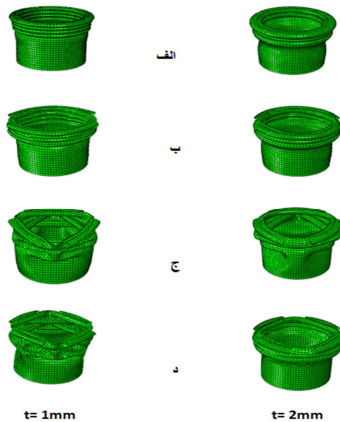
و در نتیجه انرژی ویژه کاهش می‌یابد. بنابراین بدیهی است که انرژی ویژه پوسته‌های مخروطی با زاویه نیم‌رأس (۵ درجه) دارای بیشینه انرژی ویژه است. همانطور که گفته شد زاویه نیم‌رأس تاثیر قابل توجهی بر نیروی فروریزش اولیه دارد و با افزایش زاویه نیم‌رأس پایداری پوسته تحت بار محوری کاهش می‌یابد که این موضوع مطابق شکل ۱۱، سبب کاهش نیروی فروریزش اولیه می‌شود.



شکل ۱۱- اثر زاویه نیم‌رأس و تعداد برش در لبه بر نیروی اولیه پوسته متقارن محوری

۳-۳- بررسی اثر ضخامت و تعداد برش لبه

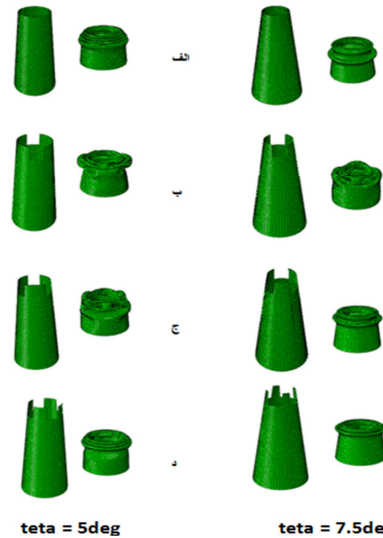
در این قسمت اثر پارامتر ضخامت بر اولین بیشینه نیرو و انرژی ویژه جذب شده پوسته‌های استوانه‌ای برش‌خورده در لبه تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری مطالعه می‌شود. قطر و ارتفاع پوسته‌های استوانه‌ای به ترتیب ۴۰ و ۸۰ میلی‌متر و ضخامت آنها برابر ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شکل ۱۲ اثر ضخامت را بر شیوه فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برش‌خورده در لبه برای ۶۰ درصد لهیدگی را نشان می‌دهد.



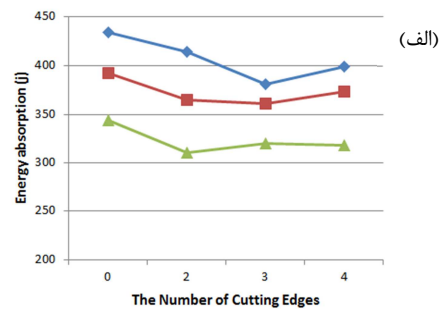
شکل ۱۲- اثر ضخامت بر نحوه فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای با تعداد برش در لبه، الف) بدون برش ب) دو برش ج) سه برش د) چهار برش

با توجه به شکل ۱۲، همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش ضخامت تعداد چین‌های خارجی و داخلی کاهش می‌یابد به طوری که تعداد چین‌های پوسته‌های استوانه‌ای با ضخامت ۱ میلی‌متر بیشتر از حالت ۲ میلی‌متر است. علت آن است که اولین چین در تمامی نمونه‌های استوانه‌ای با ضخامت بیشتر در ناحیه‌ای پایین‌تری نسبت به

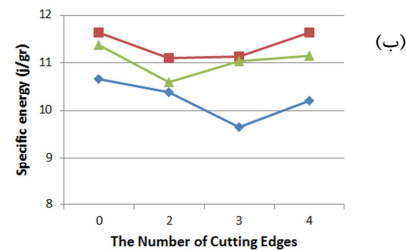
جذب شده) و نیروی اولیه فروریزش در پوسته‌های مخروطی نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای می‌شود.



شکل ۹- اثر زاویه نیم‌رأس و تعداد برش در لبه بر فروریزش پوسته‌های متقارن محوری، الف) بدون برش ب) دو برش ج) سه برش د) چهار برش در لبه



شکل ۹- الف) بدون برش ب) دو برش ج) سه برش د) چهار برش در لبه



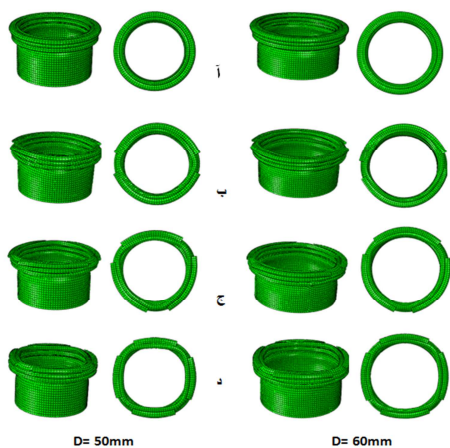
شکل ۱۰- اثر زاویه نیم‌رأس و تعداد برش در لبه، الف) انرژی جذب شده ب) انرژی ویژه پوسته‌های متقارن محوری

از آنجا که وزن پوسته‌ها با افزایش زاویه رأس کاهش می‌یابد، لذا انرژی ویژه با افزایش زاویه نیم‌رأس از صفر تا پنج و صفر تا هفت و نیم افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه نیم‌رأس از پنج تا هفت و نیم درجه، نرخ کاهش انرژی جذب شده بیشتر از نرخ کاهش وزن پوسته می‌باشد

۴-۳- بررسی اثر قطر و تعداد برش لبه

در این قسمت اثر پارامتر قطر پوسته استوانه ای بر بیشینه نیروی اولیه و انرژی ویژه جذب شده بررسی می‌شود. سایر ابعاد هندسی و شرایط مرزی ثابت در نظر گرفته می‌شود. طول نمونه‌ها برابر ۸۰ میلی‌متر و ضخامت لوله‌های استوانه‌ای برابر ۱/۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. قطر این پوسته‌ها نیز برابر ۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر انتخاب شده است.

شکل ۱۴ نحوه فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای برش خورده در مقطع با قطرهای ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. شکل ۱۵ اثر قطر و تعداد برش لبه را بر رفتار فروریزش محوری پوسته‌های استوانه‌ای برای جابجایی ۴۸ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش قطر سبب افزایش اولین بیشینه نیروی فروریزش می‌شود. همچنین افزایش قطر باعث افزایش متوسط نیروی فروریزش یا به عبارتی دیگر افزایش انرژی جذب شده در تمامی نمونه‌های استوانه‌ای برش خورده می‌شود.

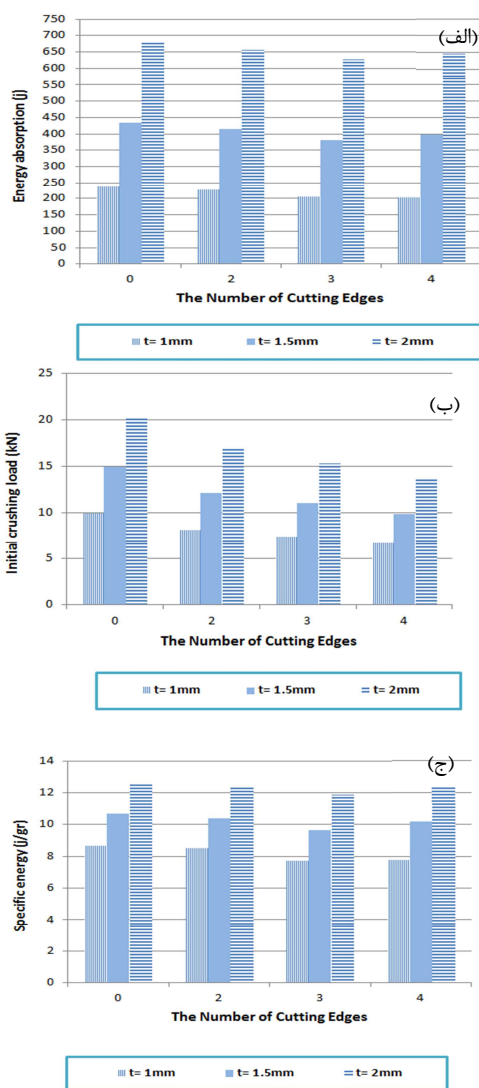


شکل ۱۴- اثر قطر و تعداد برش لبه بر نحوه فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای، (الف) بدون برش (ب) دو برش (ج) سه برش (د) چهار برش

از طرفی دیگر، افزایش قطر به نوبه خود سبب افزایش جرم لوله‌ها نیز می‌شود. همچنین مطابق شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که افزایش قطر سبب کاهش انرژی ویژه می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که افزایش قطر استوانه سبب افزایش اولین بیشینه نیروی فروریزش و متوسط نیروی فروریزش یا به عبارتی دیگر افزایش انرژی جذب شده در تمامی نمونه‌های استوانه‌ای برش خورده در لبه می‌شود. در مطالعه حاضر، افزایش قطر از ۴۰ به ۶۰ میلی‌متر باعث حداقل افزایش ۴۹ درصدی بیشینه نیروی اولیه پوسته استوانه‌ای بدون برش و حداکثر افزایش ۷۰/۵ درصدی آن برای پوسته استوانه‌ای همراه با چهار برش در لبه می‌شود. مقدار حداقل و حداکثر افزایش متوسط نیروی فروریزش نیز برای این افزایش قطر از ۴۰ به ۶۰ میلی‌متر در نمونه‌های مذکور به ترتیب در حدود ۱۷/۵ و ۲۹ درصد است که مربوط به استوانه بدون برش و استوانه با سه برش در لبه است. همچنین افزایش قطر استوانه جدارنازک سبب کاهش انرژی ویژه (نسبت انرژی جذب شده به جرم پوسته) می‌شود. در مطالعه حاضر، همچنین افزایش قطر از ۴۰ به ۶۰ میلی‌متر، سبب حداکثر کاهش ۲۱/۶ درصدی انرژی ویژه جذب شده

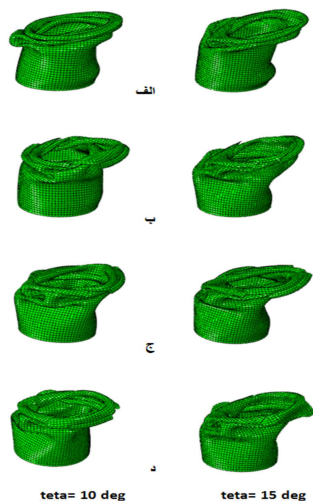
قاعده فوقانی تشکیل شده است. این موضوع باعث افزایش طول چین تشکیل شده و در نهایت کاهش چین‌خوردگی پوسته‌های استوانه‌ای نسبت به افزایش ضخامت در طی جابجایی برابر می‌شود.

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که انرژی جذب شده نمونه‌های با ضخامت ۲ میلی‌متر بیشتر از نمونه‌های با ضخامت ۱ میلی‌متر است. طبق همین شکل، افزایش ضخامت پوسته استوانه‌ای باعث افزایش اولین بیشینه نیرو می‌شود که با افزایش تعداد برش در لبه کاهش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش ضخامت پوسته‌های استوانه‌ای، جرم آنها نیز افزایش می‌یابد. نرخ افزایش انرژی جذب شده در نمونه‌های با ضخامت بالاتر، بیشتر از نرخ افزایش جرم پوسته‌های استوانه‌ای است. این موضوع باعث می‌شود انرژی ویژه نمونه‌های با ضخامت بالاتر، بیشتر باشد. این افزایش جرم در نمونه‌های با ضخامت بیشتر روند رو به رشد انرژی ویژه را کاهش می‌دهد.

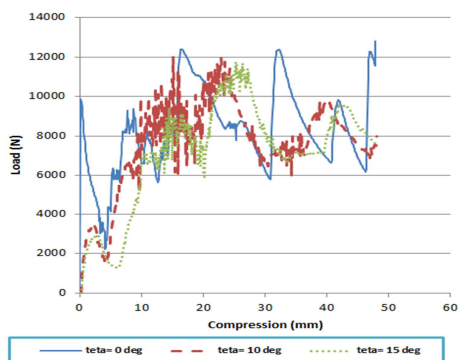


شکل ۱۳- اثر ضخامت و تعداد برش لبه بر (الف) انرژی جذب شده (ب) نیروی اولیه ویژه پوسته‌های استوانه‌ای

شکل ۱۷ نمودار نیرو-جابجایی فروریزش پوسته استوانه‌ای با چهار برش در لبه تحت بارگذاری مختلف را نشان می‌دهد که به عنوان نمونه در این مقاله آورده شده است. از آنجا که در برخورد مایل پوسته‌های استوانه‌ای به صورت مایل تغییر شکل می‌دهند، بنابراین در ابتدای جابجایی، مقدار بیشینه نیروهای نسبی ایجاد شده نسبت به برخورد محوری به شدت کاهش می‌یابد. در ادامه، با افزایش جابجایی و تماس پوسته با سطح صلب فوقانی، نیرو دوباره افزایش می‌یابد. بر اساس نمودار نیرو-جابجایی، تغییرات نیرو با تشکیل چین داخلی به صورت افزایشی و با تشکیل چین خارجی به صورت کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که این روند تغییرات نیرو نسبت به جابجایی تا فروریزش نهایی نمونه‌های استوانه‌ای تکرار می‌شود.



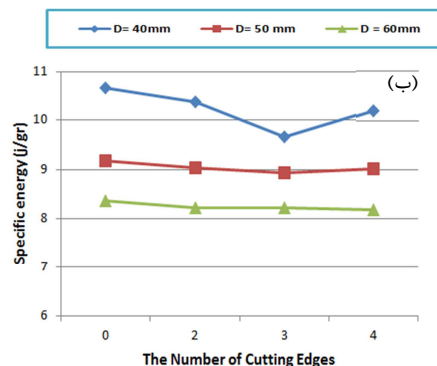
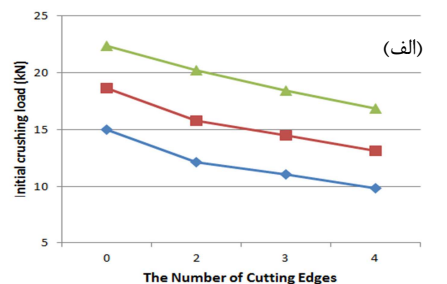
شکل ۱۶- اثر زاویه برخورد بر فروریزش نمونه‌های استوانه‌ای (الف) بدون برش (ب) دو (ج) سه (د) چهار برش



شکل ۱۷- نمودار نیرو-جابجایی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای با چهار لبه برش خورده تحت بارگذاری مختلف

در این تحقیق، با افزایش زاویه برخورد نیروی اولیه فروریزش کاهش می‌یابد. علت این کاهش در نیروی اولیه این است که با افزایش زاویه برخورد قسمت کمتری از محیط قاعده استوانه با صفحه صلب بالایی در تماس خواهد بود در نتیجه مقاومت استوانه تحت بار کاهش پیدا خواهد کرد و تحت بار کمتری دچار فروریزش اولیه خواهد شد.

برای نمونه‌های استوانه‌ای بدون برش و حداقل کاهش ۱۴/۸ درصدی برای نمونه‌های با سه برش در لبه می‌شود. این در حالی است که برای قطر ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر و همچنین ۴۰ میلی‌متر تعداد لبه برش خورده از ۲ تا ۴ برش اثر محسوسی بر انرژی ویژه و متوسط نیروی فروریزش ندارد و تنها سبب کاهش نیروی اولیه فروریزش می‌شود. این نتیجه برای کاربرد جاذب‌های برخورد در صنایع مختلف بسیار مفید است.

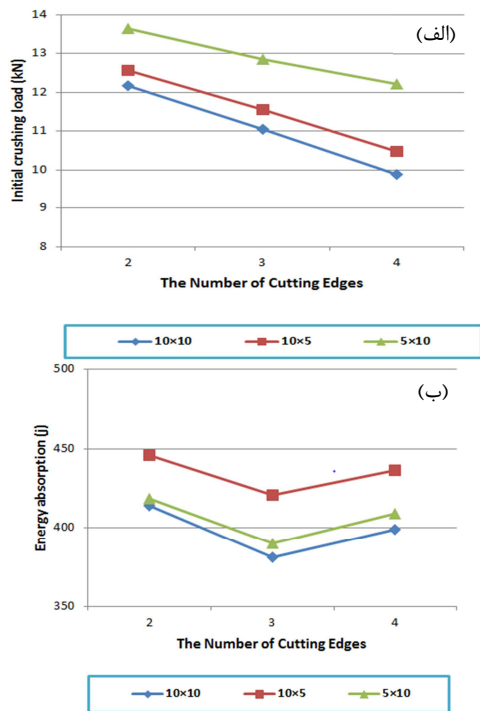


شکل ۱۵- اثر قطر و تعداد برش لبه بر (الف) اولین بیشینه (ب) انرژی ویژه فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای

۳-۵- اثر زاویه برخورد و تعداد برش لبه

سازه‌های جذب انرژی در خودروها، بیشتر اوقات تحت برخورد و بارگذاری فشاری مایل هستند. بنابراین بررسی چگونگی پاسخ جاذب انرژی تحت بارگذاری مایل مهم و ضروری است. در این مطالعه، اثر زاویه برخورد به گونه‌ای بررسی می‌شود که در آن پوسته‌های استوانه‌ای همراه لبه برش خورده تحت شرایط مرزی یک‌سرگردار قرار گرفته و جسم صلب فوقانی با زاویه‌های مختلف (۱۰ و ۱۵ درجه) به آن برخورد می‌کند. ارتفاع، ضخامت و قطر پوسته استوانه‌ای به ترتیب برابر ۸۰ و ۱/۵ و ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۶ فروریزش نهایی پوسته‌های استوانه‌ای یک‌سرگردار را با تعداد برش‌های مختلف در لبه تحت بارگذاری مایل ۱۰ و ۱۵ درجه نشان می‌دهد. بدیهی است افزایش زاویه برخورد سبب افزایش طول چین‌های تشکیل شده می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود در برخورد مایل فروریزش از ناحیه تماس پوسته نمونه‌های استوانه‌ای با صفحه صلب بالایی شروع می‌شود. بنابراین نیروی فروریزش آن نسبت به بارگذاری محوری به شدت کاهش می‌یابد.

کاهش بیشینه نیروی اولیه فروریزش می‌شود. این امر به دلیل افزایش عیوب هندسی در محیط قاعده استوانه‌ای است. این در حالی است که افزایش عمق شیار در صورت یکسان بودن عرض شیار اثر محسوسی بر اولین بیشینه فروریزش ندارد. از طرفی دیگر، نتایج نشان می‌دهند که عمق شیار اثر محسوسی بر انرژی جذب شده دارد. به طوری که افزایش عمق از ۵ تا ۱۰ میلیمتر و با عرض مشابه، کاهش نسبتاً چشمگیری در انرژی جذب شده ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است که در حالت عمق برابر، افزایش عرض شیار اثر محسوسی بر انرژی جذب شده فروریزش ندارد.



شکل ۱۸- اثر ابعاد شیار مستطیلی بر الف) نیروی اولیه فروریزش ب) انرژی جذب شده

بررسی نتایج نشان می‌دهد در صورتی که عمق شیار مستطیلی در لبه یکسان باشد، افزایش عرض شیار سبب کاهش بیشینه نیروی اولیه فروریزش می‌شود. در این تحقیق نشان داده شد که با افزایش عرض شیار از ۵ به ۱۰ میلیمتر و با عمق مشابه، اولین بیشینه نیروی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای لبه‌دار در حدود ۱۰/۸ درصد (برای دو لبه) و حدود ۱۹ درصد (برای چهار لبه) کاهش می‌یابد. این در حالی است که افزایش عمق شیار در صورت یکسان بودن عرض شیار، اثر محسوسی بر اولین بیشینه فروریزش ندارد. همچنین مشاهده می‌شود که عمق شیار اثر محسوسی بر انرژی جذب شده دارد. به طوری که افزایش عمق از ۵ تا ۱۰ میلیمتر و با عرض مشابه، انرژی جذب شده را برای پوسته‌های استوانه‌ای لبه‌دار در حدود ۹/۴ درصد (برای سه لبه) و حدود ۷/۱ درصد (برای دو لبه) کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است که در حالت عمق برابر، افزایش عرض شیار اثر محسوسی بر انرژی جذب شده فروریزش ندارد.

این در حالی است که در زوایای برخورد ۱۰ و ۱۵ درجه، با ایجاد دو برش در لبه، بار اولیه فروریزش کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. این کاهش چشمگیر در نیروی اولیه به این دلیل است که اثر برخورد مایل و اثر ایجاد برش در لبه که هر دو از عوامل کاهش نیروی اولیه هستند یکدیگر را تشدید کرده و باعث این کاهش چشمگیر در نیروی اولیه می‌شوند. افزایش برش‌ها (از ۲ تا ۴) در لبه، نیز به نوبه خود باعث کاهش نیروی فروریزش اولیه می‌شود.

نتایج اثر زاویه برخورد بر نیروی اولیه فروریزش، متوسط نیرو و انرژی جذب شده نمونه‌های استوانه‌ای تحت شرایط مرزی یک‌سرگردار در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش برش‌ها (از ۲ تا ۴) در لبه، نیز به نوبه خود باعث کاهش نیروی فروریزش اولیه می‌شود. از طرفی دیگر، همان‌طور که انتظار می‌رود، زاویه برخورد سبب کاهش انرژی جذب شده پوسته‌های استوانه‌ای می‌شود. این کاهش قابل توجه انرژی است که پژوهشگران را بر آن می‌دارد که به منظور طراحی جاذب انرژی بهتر اثر برخورد مایل آن را نیز مورد بررسی قرار دهند. در این مطالعه انرژی جذب شده پوسته‌های استوانه‌ای بدون برش در لبه برای زاویه برخورد ۱۰ و ۱۵ درجه نسبت به برخورد محوری به ترتیب ۴/۱ و ۱۲ درصد و برای پوسته استوانه‌ای با ۴ برش در لبه به ترتیب ۸/۳ و ۱۴/۴ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۷- اثر زاویه برخورد بر رفتار نمونه‌های استوانه‌ای با لبه برش خورده تحت شرایط مرزی یک‌سرگردار

تعداد برش در لبه	زاویه برخورد	نیروی اولیه فروریزش (کیلو نیوتن)	متوسط نیروی فروریزش (کیلو نیوتن)	انرژی جذب شده (ژول)
۰	۰	۱۶۹۸۴	۹۱۰۴۴	۴۳۴۱۱
	۲	۱۲۱۱۸	۸۶۲۳	۴۱۳۹۳
	۳	۱۱۰۵۴	۷۹۴۳	۳۸۱۱۳
	۴	۹۱۸۸	۸۳۰۸	۳۶۸۸
۱۰	۰	۱۱۱۱۲	۸۶۷	۴۱۶۱۶
	۲	۶۲۰۷	۸۳۴۵	۴۰۰۰۶
	۳	۲۱۶۳۶	۷۸۴۶	۳۷۶۰۶
	۴	۳۱۵۲۴	۷۶۱۲	۳۶۵۱۴
۱۵	۰	۱۰۷۱۸	۷۹۶	۳۸۱۰۸
	۲	۲۱۰۳	۷۵۹	۳۶۴۳۳
	۳	۲۱۹۲۱	۷۴۹۹	۳۵۹۹۵
	۴	۲۱۸۹۹	۷۱۰۸	۳۴۷۱۸

۳-۶- اثر ابعاد برش در لبه

بررسی اثر ابعاد شیار مستطیلی بر لبه، یکی دیگر از عوامل هندسی مؤثر بر رفتار فروریزش پوسته‌های جدارنازک استوانه‌ای است. در این بخش، اثر ابعاد برش مستطیلی در لبه بررسی می‌شود. بدین منظور ابعاد برش ۱۰×۱۰، ۵×۱۰، ۵ میلیمتر (عرض ۵ و عمق ۱۰) و ۱۰×۵ میلیمتر انتخاب شده و ابعاد هندسی دیگر شامل قطر، ضخامت و ارتفاع پوسته استوانه‌ای مشابه و به ترتیب ۴۰، ۱/۵ و ۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ابعاد هندسی شیار به همراه نتایج فروریزش در شکل ۱۸ آورده شده است. آنچه به وضوح دیده می‌شود، وابستگی نیروی اولیه و انرژی جذب شده به ابعاد هندسی شیار است. در صورتی که عمق شیار مستطیلی در لبه یکسان باشد، افزایش عرض شیار، سبب

۴- جمع بندی

- به طور کلی می توان نتایج حاصل از مطالعه پارامتری پوسته استوانه‌ای برش خورده در لبه، را به صورت جمع بندی کرد:
- فروریزش و نیروی اولیه فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای به تعداد برش لبه آن وابسته است. نتایج نشان داد که مقدار نیروی اولیه برای ۲ برش مربعی حدود ۱۸/۷ درصد و برای ۴ برش مربعی حدود ۳۴ درصد نسبت به مقدار نیروی اولیه پوسته استوانه‌ای بدون برش کاهش یافته است.
 - با افزایش زاویه نیم‌رأس، پایداری پوسته تحت بارگذاری محوری کاهش می‌یابد و باعث کاهش بیشینه نیروهای فروریزش آن نیز می‌شود. نتایج نشان داد که انرژی ویژه پوسته‌های مخروطی با زاویه نیم‌رأس ۵ درجه، دارای بیشترین انرژی ویژه است.
 - افزایش ضخامت باعث کاهش تعداد چین‌های خارجی و داخلی و باعث افزایش نیروی اولیه فروریزش، انرژی جذب شده و انرژی ویژه جذب شده می‌شود.
 - در پژوهش حاضر، افزایش قطر پوسته استوانه‌ای از ۴۰ به ۶۰ میلی‌متر باعث حداقل افزایش ۴۹ درصدی بیشینه نیروی اولیه پوسته استوانه‌ای بدون برش و حداکثر افزایش ۷۰/۵ درصدی آن برای پوسته استوانه‌ای همراه با چهار برش در لبه می‌شود.
 - نتایج نشان می‌دهد که در زوایای برخورد ۱۰ و ۱۵ درجه، با ایجاد دو برش در لبه، بار اولیه فروریزش، نسبت به حالت بدون برش کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.
 - برای حالتی که عمق شیار مستطیلی در لبه یکسان باشد، افزایش عرض شیار سبب کاهش بیشینه نیروی اولیه فروریزش می‌شود.

مراجع

- [9] Nikkhah, H., Baroutaji, A. and Olabi, A.G., Crashworthiness design and optimisation of windowed tubes under axial impact loading. *Thin-Walled Structures*, 142, pp.132-148, 2019.
- [10] Isaac, C.W., Crushing response of circular thin-walled tube with non-propagating crack subjected to dynamic oblique impact loading. *International Journal of Protective Structures*, p.2041419619849087, 2019.
- [11] Sun, G., Li, S., Li, G. and Li, Q., on crashing behaviors of aluminium/CFRP tubes subjected to axial and oblique loading: An experimental study. *Composites Part B: Engineering*, 145, pp.47-56, 2018.
- [12] Rahi, A., Experimental and crash-worthiness optimization of end-capped conical tubes under quasi-static and dynamic loading. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, pp.1-10, 2018.
- [13] Davoudi, M. and Kim, C., 2018. Evaluation of the axial crashworthiness of thin-walled structures with various and combined cross sections. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(9), pp.4271-4281.
- [۱۴] نجف زاده اصل، امید؛ محمد حسین پل، نبی اله رضایی گلشن، ۱۳۹۷، بررسی تجربی پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار لوله های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری، نشریه مهندسی مکانیک مدرس، تیر ۱۳۹۷ شماره ۴.
- [۱۵] نجف زاده اصل، امید؛ محمدحسین پل؛ نبی اله رضایی گلشن، ۱۳۹۷، بررسی تجربی و مقایسه رفتار لوله های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری محوری دینامیکی و شبه‌استاتیکی، سومین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و هوافضا، تهران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - انجمن مهندسی حرارتی و برودتی ایران.
- [۱۶] آذرخش، سجاد و مجتبی بابایی، ۱۳۹۷، بررسی تجربی رفتار مکانیکی لوله های تک جداره و دوجداره مربعی تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی، اولین همایش بین المللی مهندسی مکانیک، صنایع و هوافضا، همدان.
- [۱۷] آذرخش، سجاد؛ عباس رهی، سامان دریکوندی، علی قمریان، ۱۳۹۶، تحلیل تجربی و عددی رفتار فروریزش محوری و مایل لوله های دوجداره مخروطی تحت شرایط مرزی دوسرگیردار، نشریه دانش و فناوری هوافضا، ۱۳۹۶، شماره ۱.
- [۱۸] دامغانی نوری، محمد؛ حسین حاتمی؛ علی قدس بین جهرمی، ۱۳۹۴، بررسی تجربی استوانه های مشبک تحت بارگذاری ضربه ای به عنوان جاذب انرژی، مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین ۱۳۹۴، دوره ۱۵، شماره ۱.
- [۱۹] آذرخش، سجاد؛ عباس رهی؛ علی قمریان، ۱۳۹۵، بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار لهیدگی پوسته های استوانه‌ای برنجی، دوره ۶، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۹۶-۱۸۱.
- علوی نیا، علی؛ و رضا رحمانی، بررسی تجربی و عددی رفتار مکانیکی سازه های ساندویچی استوانه ای پر شده با فوم EVA تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی و ضربه‌ای، مجله مهندسی مکانیک مدرس، تابستان ۱۳۹۸، دوره ۴۹، شماره ۲.
- [1] Alexander J.M., An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 13, No.1, pp. 10-15, 1960.
- [2] Mollmann H., *Introduction to Theory of Thin Shells*, John Wiley & sons, New York, 1982.
- [3] Abramowicz W. and Jones N., Dynamic axial crushing of circular tubes. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 2, No.2, pp. 179-208, 1984.
- [4] Yamada Y., Banno T., Xie Z. and Wen C., Energy Absorption and Crushing Behaviour of Foam-Filled Aluminium Tubes. *Materials Transactions*, Vol.46, No.12, pp. 2633-2636, 2005.
- [5] Yuen S.C. and Nurick G., The energy-absorbing characteristics of tubular structures with geometric and material modifications: an overview. *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 61, No.2, 2008.
- [6] Ghamarian A. and Abadi M. T., Axial crushing analysis of end-capped circular tubes. *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, No.6, pp. 743-752, 2011.
- [7] Azarakhsh S. and Ghamarian A., Collapse behavior of thin-walled conical tube clamped at both ends subjected to axial and oblique loads. *Thin-Walled Structures*, Vol. 112 pp. 1-11, 2017.
- [8] Ahmadi, A. and Asgari, M., Efficient crushable corrugated conical tubes for energy absorption considering axial and oblique loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(11), pp.3917-3935, 2019.